

微气体流量计的模拟与优化

王沫然, 陈泽敬, 李志信

(清华大学工程力学系传热强化与过程节能教育部重点实验室, 北京 100084)

E-mail: moralwang99@mails.tsinghua.edu.cn

摘要: 温差法测流量是一种新型气体流量计的基本原理, 温度传感器的布置对流量计的性能影响很大。本文使用基于分子运动理论的直接模拟 Monte Carlo 法对这种微气体流量计通道内的气体流动进行了数值模拟, 对比了有无传感器时速度场和温度场的分布, 指出传感器的布置对温度场的影响很小, 并根据温差分布规律提出了传感器布置的优化方案。

关键词: 气体流量计; 数值模拟; 直接模拟 Monte Carlo

中图分类号: TH814 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-4776(2003) 07/08-0065-03

Simulations and optimization for micro gas flowmeter

WANG Mo-ran, CHEN Ze-jing, LI Zhi-xin

(Key Lab of Education Ministry of Heat Transfer Enhancement and Energy Conservation,
Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The collocations of temperature sensors have a great effect on the performance of a new gas flowmeter, which is based on the relationship between flowrate and upstream-downstream temperature difference. The molecule-based direct simulation Monte Carlo method is applied to numerically simulate the micro gas flow in the flowmeter channel. The velocity and temperature fields are compared between with and without sensors. The results show that the sensor existence has little effect on the temperature distribution. Based on the results of temperature difference distribution, the optimization for the flowmeter is proposed.

Key words: gas flowmeter; numerical simulation; direct simulation Monte Carlo

1 引言

测量技术是微/纳尺度科学与技术发展过程中需要解决的一个非常重要的问题,以流量测量为例,由于微系统中流体的流动空间所限,单位时间流过流体的量非常小,传统测量方法例如“称量法”和“压差法”等难以适用,因此必须发展新的测量原理和方法。图1所示为一种新型的基于热交换原理的流量计示意图,流体流过加热器被加热,通过测量上下游两点的温度差得到流量信息^[1~3]。在一般情况下,由于通道尺寸小,气体流量小,两个传感器间的温差也较小,因此传感器的合理布置是提高流量计整体

性能的关键因素。合理准确地对通道内气体流动和换热情况进行数值模拟可以为流量计的优化提供有效依据。然而,我们注意到气体在微/纳通道内的流动,当通道的特征尺度与气体的平均自由程处在同一量级时,连续介质假定将不再适用,必须使用基于分子运动的方法^[4]。直接模拟蒙特卡罗法(DSMC)是一种基于分子运动理论和统计规律的流体计算方法^[5]。DSMC方法不仅在理论上证明是同 Boltzmann 方程式一致的^[6],而且其模拟结果也得到了大量实验的验证,近年来还被用来验证其他方法例如 Burnett 方程的适用性^[7]。目前,许多学者已经把 DSMC 方法应用在 MEMS 中的气体流动与换热研

收稿日期: 2003-05-15

基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目(59995550-2); 国家重点基础研究发展规划项目(GI999033106)

究中^[8~11]。

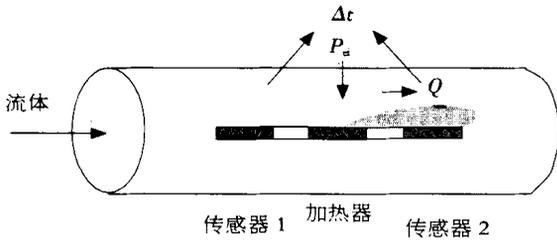


图1 温差流量计的原理示意图

本文使用 DSMC 方法对微/纳气体流量计内的气体流动和换热进行了数值模拟,对其性能进行分析并提出传感器布置方式的优化方法。

2 数值方法

直接模拟 Monte Carlo (DSMC) 方法是一种基于分子运动和统计规律,用来模拟高努森数气体流动的数值方法。它通过计算成千上万的模拟粒子的运动和碰撞再现了气体分子的运动过程,使气体流动的动力学方程得到求解。在模拟过程中,每个模拟粒子代表大量的真实气体分子,在分子混沌和气体稀薄的基本假设条件下,只考虑粒子间的二元碰撞,从而当计算时间步长小于物理碰撞时间时,分子的运动与分子间碰撞可以解耦。同时,在粒子运动、粒子间碰撞及粒子与边界间相互作用时保持动量和能量的守恒。

在仿真的开始阶段,所有的粒子都被均匀地随机分布到网格中,在每个时间步中,粒子先以各自的速度平移一小段距离,并完成与边界的可能碰撞,然后粒子按一定顺序标号。在每个网格中,根据一定的原则选取“碰撞对”,并计算粒子碰撞后的速度分量。通用的选取方法是无时间计数器 (NTC) 方法。流动的宏观特性通过统计规律采样计算得到。重复上述的步骤直到统计误差足够小。DSMC 方法可以用来计算非平衡态和非稳态的流动。

目前用来计算粒子间碰撞规律的模型有很多种,例如可变硬球 (VHS) 模型、可变软球 (VSS) 模型、通用硬球 (GHS) 模型和通用软球 (GSS) 模型等,它们可以适用于不同的流况。然而最新的研究表明在大多数 MEMS 应用的场合,即压力不太大、温度不太高也不太低的状态下,各种模型所计算结果间的差距很小,因此本文采用计算效率最高的 VHS 模型。

时间步长的选取应保证小于粒子平均碰撞时间。本文借鉴传统 CFD 的做法,定义一个 CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) 数,需要保证

$$CFL = \frac{c_m t}{x} < 1 \quad (1)$$

其中: c_m 为分子的最可几速度, x 为网格长度, t 为时间步长。在本文的模拟中, CFL 数的值取为 0.2。

固壁采用等温边界条件,模拟粒子与壁面碰撞采用完全散射模型。在这种模型下,热协调系数与动量协调系数都为 1。

流场的宏观物理特性可以通过如下的统计公式计算得到

$$U_j = \frac{1}{N_j} \sum u \quad (2)$$

其中 U_j 表示 j 网格的宏观平均速度, N_j 表示 j 网格内的粒子数。

$$T = (3 T_{tr} + T_{rot}) / (3 + \nu) \quad (3)$$

其中: T_{tr} 代表平动温度, T_{rot} 代表转动温度, ν 为内能自由度。振动温度被忽略。平动温度和转动温度由下面公式计算

$$T_{tr} = 2 [\overline{mv^2} - \overline{m(\bar{V})^2}] / 3k \quad (4)$$

$$T_{rot} = \frac{2}{k} \left(\overline{\frac{rot}{\nu}} \right) \quad (5)$$

式中 v 为分子的速度, k 为 Boltzman 常数, rot 为单个分子的转动能。

3 结果及分析

本文对如图 2 所示的微流量计的二维简化模型进行了模拟分析。设气体在二维直通道内流动,通道尺寸为 $L = 50 \mu\text{m}$, $H = 5 \mu\text{m}$,通道中央布置一个加热器,加热器前后对称布置两个温度传感器,加热器与传感器的间距 $D = 10 \mu\text{m}$,传感器高度 $d = 1.0 \mu\text{m}$ 。无穷远流速度 $U = 30 \text{ m/s}$,来流温度 T 与通道壁温都为 300 K,加热器表面的温度保持在 500 K。气体的努森数设为 0.1,在这种情况下,传统的 CFD 模拟不再适用。模拟中使用了 100×10 的均匀矩形网格,每个网格内又划分 2×10 个子网格。平均每个网格内分布了 100 个粒子,总采样数超过 5×10^6 。

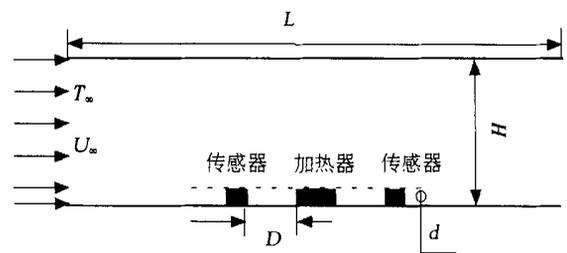


图2 二维模型

首先,研究了传感器对通道内气体速度场和温度场的影响,对比了有、无传感器时气体的流动和换热情况。

图3所示对比了有、无传感器时通道中心线上的速度和温度分布。由于气体的马赫数比较小,计算得到的宏观速度因统计误差而表现出随机波动性

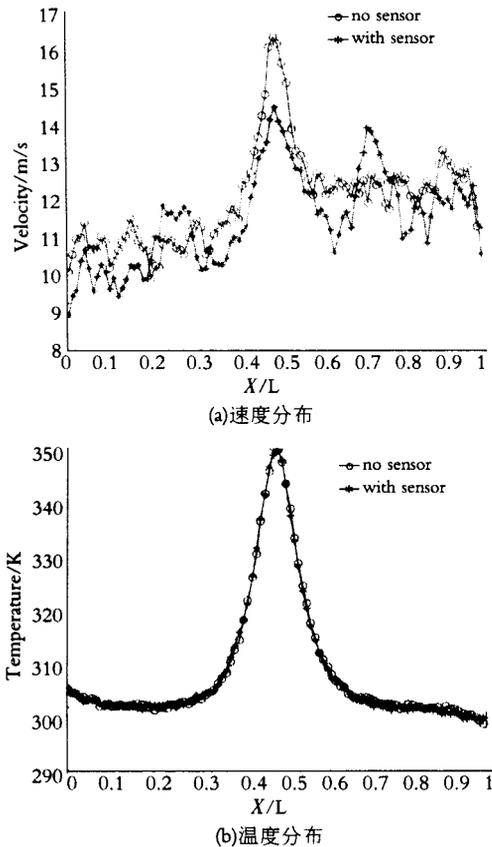


图3 有无传感器时通道中心线上的速度和温度分布是不可避免的,但从图中可以清晰地看出,传感器的有、无对气体的速度分布的影响比较大,而对通道中心线上的温度分布影响很小,两种情况下的温度分布几乎一致。图4所示对比了有、无传感器时在加热器上表面高度水平上的速度和温度分布,这个高度也可以认为是有传感器时的传感器测量值高度。同图3表现出的规律类似,两种情况下速度分布差异较大,但温度分布符合很好。

图3和图4的结果表明,传感的有无和布置情况虽然对通道内的流场有一定影响,但对温度场的影响不大。而在我们所研究的微流量计原理中,温度场的分布可以反映流量信息,在相同的流量下,两传感器位置上的温度差异越大,流量计的灵敏度和精度就越好,流量计的性能也就越强,因此在以上研究结果的基础上提出,使用无传感器的通道模拟结果可以分析得出传感器布置的最佳位置。

图5所示图形为以加热器为对称中心,前后对

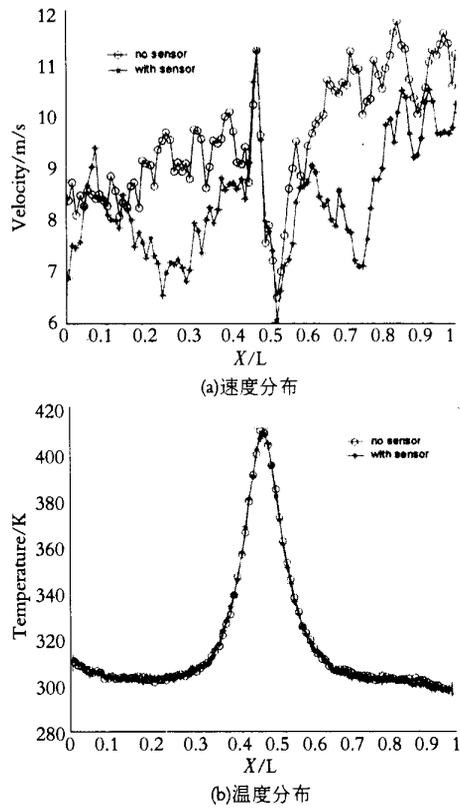


图4 有无传感器时加热器表面高度上的速度和温度分布。对称位置上的温度差随距离的变化曲线。横轴的间距使用通道宽度作无量纲化处理,纵轴为后、前位置上的温度差。由图可见,温差随距离的增大先增大后减小,在 $D/H=1$ 附近 T 有最大值。当 D/H 接近5时表示出口段和入口段位置,显然在这里布置传感器是不合适的。因此, $D/H=1$ 附近,即在传感器间温差达到最大值处布置传感器可以使流量计的性能达到最佳。

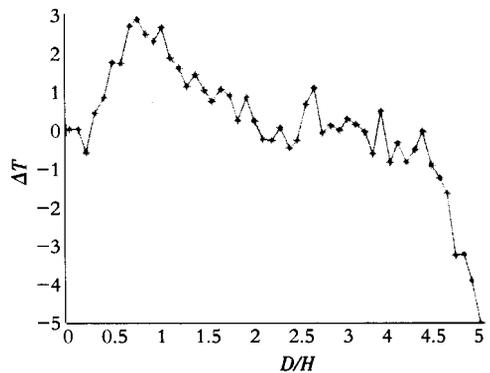


图5 温差随位置变化曲线

模拟结果表明,当两个温度传感器布置在与加热器的距离等于通道宽度的位置上时,两传感器的温差可以达到最大,即可使流量计的性能达到最优。

(下转第73页)

象,现在就这个问题的几种原因做初步的研究^[2,3]。

校验错误可能是其中的一个原因,有以下两个方面会导致这个错误的发生,从而导致数据丢失。一方面,在制定通信协议的时候服务器跟下位机所用的校验算法不一样。这要求在制定通信协议的时候就要求对校验的数据的内容、校验码长度、校验算法做出准确规定。另外一方面,串口硬件在传输数据的时候也会对数据进行校验,如果服务器跟下位机所用的校验方式不一样,那么也会产生校验错误。因此通信的校验方式要求在服务器和下位机上必须一致。

对 Modem 的操作不当也会导致数据丢失。其一,主要体现在 Modem 在接收到命令后会吧命令返回计算机显示,这就对编程不利,应当把 Modem 的这种回显关掉。其二,Modem 接收到命令后需要处理时间,如果连续发送控制命令,就有可能导致第二个命令失效,解决的方法就是在连续的两个命令之间加入适当的延迟时间,这个时间一般在 1~10 s 之内即可。

服务器软件运行在不同的硬件系统上也会产生数据丢失的现象。这是因为不同的硬件系统的运行时钟有所不同,而在软件中所用的时间延迟函数如

果编写不恰当就会依赖硬件的时钟频率。如果在 200 MHz 时钟下延迟 1 s 的函数,在 2 GHz 的系统上则可能只有 0.1 s,这是个严重的偏离。解决方法就是编写与系统时钟频率无关的延迟函数。

5 结 论

本文所提及的软硬件系统正在调试运行,硬件系统运行情况良好,软件系统的情况也比较理想,能从下位机上获得所需要的各种气象数据并且正确处理。通过对数据丢失的分析能较好的解决数据丢失的错误。系统的长期的稳定性和可靠性还有待进一步的考察。

参考文献:

- [1] 殷长友,方惠忠,强宏. 气候数据采集分析系统的实现[J]. 计算机应用研究,2001,(10):126.
- [2] 唐月. 串行异步通信软件设计中的注意事项[J]. 电子技术,2000,(9):21-23.
- [3] 牧原,王俊杰. DOS 和 Windows 下的 Modem 串行通信编程[J]. 计算机应用,2002,22(3):62.

作者简介:

胡德胜 (1979-),男,江西高安人,学士,2001年毕业于四川大学电力工程系,现为东南大学电子工程系 01 级硕士研究生,研究方向为微电子机械系统。

(上接第 67 页)

4 结 论

本文使用直接 Monte Carlo 模拟方法对一种新型的微尺度气体流量计进行了模拟,对温度传感器的布置方式进行了分析。研究结果表明,当温度传感器与加热器的距离等于流量计通道的宽度时,温度传感器的温度差可以达到最大,即可以使流量计的性能达到最佳。

参考文献:

- [1] 王沫然,李志信. 微尺度热科学及其在 MEMS 中的应用[J]. 仪表技术与传感器,2002,7:1-4.
- [2] 王沫然,李志信. 基于 MEMS 的微流体机械研究进展[J]. 流体机械,2002,30:23-28.
- [3] ASHAUER M, SCHOLZ H, BRIEGEL R, *et al.* Thermal flow sensors for very small flow rate[A]. The 11th Int Conf on Solid State Sensors and Actuators [C]. Berlin, Germany,2001,1464-1467.
- [4] KARNIADAKIS G E AND BESKOK K A. Micro Flows: Fundamentals and Simulation[M]. Germany, Springer, 2002.
- [5] BIRD G A. Molecular Gas Dynamics and The Direct Simulation of Gas Flows [M]. Clarendon Press, 1994.
- [6] WAGNER W. A convergence proof for Bird's direct simulation

Monte Carlo method for the Boltzmann equation[J]. J Stat Phys 1992, 66: 1011.

- [7] MACKOWSKI D W, Papadopoulos D H, ROSNER D E. Comparison of Burnett and DSMC predictions of pressure distributions and normal stress in one-dimensional, strongly nonisothermal gases[J]. Physics of Fluids, 1999, 11(8): 2108-2116.
- [8] LIOU W W, FANG Y. Heat transfer in microchannel devices using DSMC [J]. J MEMS, 2001, 274-279.
- [9] HADJICONSTANTINOU N G, SIMEK O. Constant-wall-temperature Nusselt Number in Micro and nano-channels [J]. J. Heat Transfer of ASME. 2002, 356-364.
- [10] FAN J, SHEN C. Statistical simulation of low-speed rarefied gas flows [J]. J of Computational Physics, 2001, 167: 393-412.
- [11] SUN Q, BOYD I D. A direct simulation method for subsonic, microscale gas flows [J]. Journal of Computational Physics, 2002, 179: 400-425.

作者简介:

王沫然 (1977-),吉林省吉林市人,清华大学工程力学系,博士研究生,主要从事 MEMS/NEMS 中的流动和换热机理研究;

陈泽敬 (1968-),男,福建土田人,清华大学工程力学系,讲师,主要从事传热强化实验、玻璃窑炉数值模拟与航天器地面模拟等研究;

李志信 (1947-),男,河南新乡人,清华大学工程力学系,教授,博士生导师,主要从事强化换热、微尺度流动和换热研究。